

0721707-1



На правах рукописи  
УДК 533.722:541.183.5

Сажин Олег Владимирович

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ  
НА МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ  
УЛЬТРАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В КАНАЛАХ**

Специальность 01.04.14. – “Теплофизика и теоретическая теплотехника”

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискании учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург - 2001

Работа выполнена на кафедре общей и молекулярной физики и в отделе теплофизики и поверхностных явлений НИИ Физики и прикладной математики Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Научный руководитель -

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Борисов С.Ф.

Официальные оппоненты -

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Байдаков В.Г.

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Купряжкин А.Я.

Ведущее учреждение -

Институт химии твёрдого тела УрО  
РАН

Защита состоится «10» мая 2001 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора физико-математических наук в Уральском государственном университете им. А.М. Горького (620083, г. Екатеринбург, К-83, пр. Ленина 51, комн. 248).

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «6» апреля 2001 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Н.В. Баранов



### 1. Актуальность проблемы.

Прогресс в теории тепло- и массопереноса в гетерогенных системах и на межфазной границе «газ-твёрдое тело» в существенной мере определяется успехами в развитии представлений о рассеянии отдельных молекул атомами поверхности и элементами ее микроструктуры. Элементарные процессы, связанные с переносом энергии и импульса в таких системах, принято учитывать путем задания соответствующих граничных условий. Для построения граничных условий к уравнениям тепло- и массопереноса, которые адекватно бы отражали реальные процессы, происходящие на микроуровне, требуются либо экспериментальные данные, либо детальные модели рассеяния, построенные из первых молекулярных принципов. Поэтому теоретическое и экспериментальное исследование, связанное с получением данных о влиянии взаимодействия газовых молекул с поверхностью твёрдого тела на макроскопические характеристики газа и развитием модельных представлений о процессах, происходящих на межфазной границе «газ – твёрдое тело», представляется актуальным.

Кроме того, проблема взаимодействия газа с поверхностью имеет практический аспект. В частности, расчеты вакуумных систем, проблемы оценки торможения и теплообмена летательных аппаратов, а также ряд других практических задач, связанных с переносом энергии и импульса между разреженным газом и твердым телом, требуют как развития теории, так и экспериментальных данных для конкретных систем.

Выполненное исследование посвящено вопросам теории тепло- и массопереноса в системе «газ - твёрдое тело», а также физическим и численным экспериментам, связанным с изучением влияния состояния поверхности на характер течения разреженных газов в каналах.

Диссертационная работа выполнена в рамках исследований, проводимых в отделе теплофизики и поверхностных явлений НИИ ФПМ при УрГУ (тема 2.2.5/2), при частичной поддержке Грантов CRDF No: REC-005 и INTAS No: 99-00749.

### 2. Цели и задачи работы.

Целью настоящей работы является получение данных о влиянии взаимодействия газовых молекул с поверхностью твёрдого тела на макроскопические потоки ультрарежеженного газа и развитие модельных представлений о процессах, происходящих на межфазной границе «газ – твёрдое тело».

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка методики получения информации о взаимодействии молекул с поверхностью из экспериментальных данных по течению газов в каналах;
- разработка методики приготовления поверхности с заданными свойствами;
- разработка методики измерения проводимости цилиндрического канала в свободномолекулярном режиме в условиях контроля поверхности;
- проведение эксперимента по исследованию влияния химического состава поверхности на газодинамическую проводимость цилиндрического канала в свободномолекулярном режиме;

- обобщение данных о влиянии свойств межфазной границы «газ – твердое тело» на формирование потоков разреженного газа в каналах;
- численное моделирование свободномолекулярного течения газа в каналах методом Монте-Карло;
- исследование роли микронеровностей в процессе формирования потока ультра разреженного газа в каналах методом численного моделирования;
- моделирование процесса релаксации разреженного газа в ограниченном пространстве с целью отработки метода расчёта.

### 3. Научная новизна.

- новым является экспериментальный подход к исследованию влияния химического состава поверхности канала на его газодинамические характеристики, основанный на создании атомарно-чистой поверхности путем напыления различных металлов в глубоком вакууме и создании покрытия за счет адсорбции газов;
- новыми являются полученные экспериментально данные по свободномолекулярной проводимости цилиндрического канала с атомарно-чистой металлической поверхностью и поверхностью, покрытой адсорбатом, для ряда инертных газов (*He, Ne, Ar, Kr*);
- новым результатом является обнаруженная слабая зависимость газовой проводимости каналов с чистой металлической поверхностью от природы металла (*Ag, Ti*);
- к новым относятся данные по коэффициентам диффузности рассеяния инертных газов на различных поверхностях, полученные путём сравнения результатов численного моделирования процесса свободномолекулярного течения газа в цилиндрическом канале с результатами выполненного эксперимента;
- новыми являются результаты комплексного исследования методом Монте-Карло влияния геометрии канала, шероховатости поверхности и коэффициента диффузности на свободномолекулярное течение газа в прямоугольном канале.

### 4. Научная и практическая ценность.

- предложена методика приготовления внутренней поверхности цилиндрического канала в виде тонкой плёнки атомарно-чистого металла;
- выявлены закономерности влияния химического состава поверхности на газодинамическую проводимость цилиндрического канала в свободномолекулярном режиме течения;
- получены коэффициенты диффузности для систем «инертный газ - атомарно-чистая поверхность металла (*Ag, Ti*)» и «инертный газ - адсорбат», которые могут быть использованы при практических расчетах;
- в рамках метода Монте-Карло предложена процедура моделирования течения газа в канале с неоднородным химическим составом поверхности;
- разработан программный продукт, с помощью которого возможно моделировать поведение газовых молекул в ограниченном пространстве, изменяя форму ограничивающей поверхности, закон рассеяния на поверхности, температуру поверхности и начальное распределение частиц в объёме.



## **5. Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

- методика экспериментального исследования свободномолекулярного течения газа в цилиндрическом канале с поверхностью контролируемого состава;
- экспериментальная зависимость свободномолекулярной проводимости канала от состояния поверхности и рода газа;
- положение о том, что проводимость канала с атомарно-чистой поверхностью металла существенно превышает проводимость канала с поверхностью, полностью покрытой адсорбатом;
- зависимость газодинамической проводимости цилиндрического канала в процессе экспозиции от степени покрытия поверхности канала кислородом, полученная с использованием метода Монте-Карло;
- результаты численного моделирования свободномолекулярного течения газа в каналах методом Монте-Карло с учётом шероховатости поверхности и произвольной аккомодацией молекул на поверхности.
- результаты численного моделирования процесса релаксации разреженного газа в ограниченном пространстве.

**6. Достоверность результатов обеспечивается:** использованием проверенных практикой современных представлений и моделей; применением апробированных экспериментальных методик; совпадением полученных результатов в предельных случаях с наиболее надёжными экспериментальными и теоретическими данными; применением ультравысоковакуумной техники и оборудования, обеспечивающего контроль состояния газовой фазы и поверхности независимыми взаимодополняющими методами; использованием современных методов статистической обработки и численного моделирования с применением многопроцессорной техники.

**7. Личный вклад автора.** Все основные результаты работы получены автором лично. Экспериментальные исследования течения газа в канале с поверхностью титана проводились совместно с научным сотрудником А.В. Накаряковым. Обсуждение направления исследований, формулирование задач и обсуждение результатов осуществлялось совместно с научным руководителем профессором С.Ф. Борисовым. Проблемы интерпретации экспериментальных результатов, постановки частных задач по моделированию обсуждались совместно с доцентом А.Н. Кулёвым. Численное моделирование, анализ и обобщение полученных данных, формулировка выводов по результатам исследований проведены автором диссертации лично.

Основная часть работы, связанная с численным моделированием, выполнена с применением многопроцессорной Супер-ЭВМ МВС 100 Института математики и механики УрО РАН путём использования канала удалённого доступа.

**8. Аprobация работы.** Результаты исследований докладывались и обсуждались:

- на Четвертой Научно - Технической конференции с участием зарубежных специалистов “Вакуумная наука и техника” (г. Гурзуф, 23-30 сентября 1997г.);
- на V Международной конференции молодых учёных “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (г. Новосибирск, 27-30 апреля 1998г.);

- на Второй Национальной Конференции по Теплообмену (г. Москва, 26-30 октября 1998 г.);
- на международном симпозиуме: 32-th IUVSTA Workshop On Gas-Surface Interaction (St-Petersburg, 25-29 September 2000);

Отдельные части работы представлены на Второй Научно - Технической конференции с участием зарубежных специалистов "Вакуумная наука и техника" (г. Гурзуф, октябрь 1995г); Всероссийской Научной - Технической конференции "Физика конденсированного состояния" (г. Стерлитамак, 22-25 сентября 1997г.); 21-th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (Marseille, 26-31 July 1998); 22-th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (Sydney, 22-29 June 2000); Международной Научно-практической конференции "Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики" (г. Новочеркасск, октябрь 2000).

**9. Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 статьи. Список работ приведен в конце реферата.

**10. Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 130 страниц, включая 51 рисунок и 15 таблиц. Список литературы содержит 105 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, которой посвящена диссертационная работа. Кратко рассмотрена роль макроскопического и микроскопического подходов к исследованию проблемы, а также роль граничных условий в задачах динамики разреженного газа. Сформулированы основные цели и задачи работы.

**В первой главе** приводится краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований по проблеме обтекания твердых тел потоком разреженного газа. Приводятся известные схемы построения граничных условий. Обосновывается целесообразность использования наиболее распространенной зеркально-диффузной схемы Максвелла.

Представлена феноменологическая классификация режимов рассеяния, предложенная на основании экспериментов с молекулярными пучками [1]. Режимы рассеяния характеризуются теми специфическими свойствами системы «газ-поверхность», которые доминируют в процессе рассеяния. Удобство разделения на режимы заключается в простоте интерпретации полученных экспериментальных данных, если известно, к какому режиму рассеяния относятся эти данные. В связи с этим рассматривается совокупность безразмерных параметров, которые служат для определения режимов и оценки относительного вклада того или иного процесса в перенос энергии и импульса между газом и твердым телом. На примере серебра показано, что рассеяние инертных газов атомарно-чистой поверхностью можно отнести к тепловому режиму рассеяния, а рассеяние поверхностью, покрытой физически адсорбированными молекулами, - к структурному.

Рассматриваются экспериментальные подходы к исследованию процесса обтекания поверхности потоком разреженного газа. Обосновывается эффектив-

ность использования подхода, основанного на изучении внутреннего течения газа в каналах, с целью получения сведений о взаимодействии молекул с поверхностью твёрдого тела.

Представлен анализ экспериментальных данных по течению ультраразреженного газа в каналах.

В конце главы сделаны краткие выводы, которые позволили сформулировать основные цели и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию влияния состояния поверхности на течение разреженного газа в цилиндрическом канале.

В работе реализован метод нестационарного потока, сущность которого заключается в измерении зависимости от времени давления  $p$ , созданного на одном из концов канала в объёме  $V_0$ , при свободномолекулярном истечении газа в вакуум (рис.1). В качестве характеристики процесса истечения целесообразно выбрать проводимость канала  $M$  - величину, которая является удельным расходом газа при единичном перепаде давлений на концах канала.

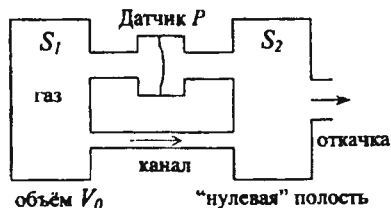


Рис.1. Схема измерений.

Для измерения свободномолекулярной проводимости канала использовалась сверхвысоковакуумная установка [2], схема которой представлена на рис. 2. Установка включает следующие основные части:

- камера напуска  $S_1$ , оснащённая системой очистки исследуемого газа от активных примесей (азотная криопанель и титановый геттер) и системой автоматической регистрации давления (мембранный микроманометр ёмкостного типа, соединённый с компьютером);
- высоковакуумная камера  $S_2$ , со встроенным масс-спектрометром и электронным оже-спектрометром. Камера соединена с гелиевым крионасосом;
- канал, соединяющий обе камеры.

Давление в камерах контролировалось также с помощью ионизационного манометра.

Предельное остаточное давление в высоковакуумной камере  $S_2$  составляет  $\sim 10^{-10}$  Па, в камере напуска газа  $S_1$  -  $\sim 10^{-8}$  Па. Для получения гарантированного состава атмосферы остаточных газов дополнительно включается источник кислорода, вмонтированный в высоковакуумную камеру.

Во время истечения газа давление в высоковакуумной камере  $S_2$  не превышало 0,1 % от давления на входе в канал, что обеспечивалось высокой быстротой действия криогенного насоса (не менее 300 л/с в диапазоне давлений  $10^{-1} \div 10^{-6}$  Па при максимальной проводимости канала по He - 0,8 л/с).

Предложена методика измерения проводимости канала на основе применения мембранного микроманометра ёмкостного типа. Использование такого микроманометра продиктовано его достоинствами: независимость показаний от рода газа; высокая чувствительность; высокая стабильность показаний; высокая линейность выходной характеристики; низкая инерционность; регулируемый уровень чувствительности.

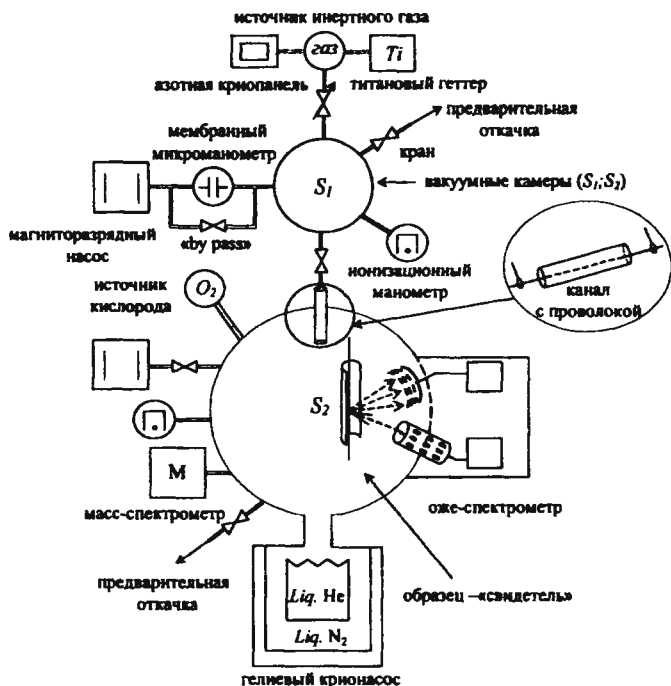


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Микроманометр имеет следующие основные характеристики:

- чувствительность  $7,8 \cdot 10^{-6}$  Па/Гц;
- нелинейность выходной характеристики  $10^{-3}\%$ ;
- нестабильность показаний  $0,2$  Гц.

Канал изготовлен из толстостенного стекла «пирекс» и имеет цилиндрическую форму (радиус канала  $r=7.2$  мм, длина  $l=124$  мм). На внутреннюю поверхность канала наносилось металлическое покрытие.

Предложена методика приготовления атомарно-чистого покрытия поверхности канала за счёт напыления тонкой плёнки металла на подложку в глубоком вакууме. Напыление осуществлялось путём испарения тонкой металлической нити, натянутой по оси канала. Использовались металлы: Ag, Ti, Mo. Рассчитаны параметры процесса напыления и длина испарителя, необходимые для получения гарантированного покрытия поверхности канала исследуемым металлом.

Приводятся данные по химическому составу металлической поверхности, полученной методом напыления в глубоком вакууме. Представлены производные оже - спектров поверхности образца - «свидетеля», снятые сразу после напыления титана и после длительной выдержки в атмосфере остаточных газов высоковакуумной камеры  $S_2$  [2]. В частности, показано, что описанным методом в условиях данной экспериментальной установки возможно получение атомарно-



чистой и полностью адсорбированной поверхности металла. Процедура получения поверхности, полностью покрытой адсорбированными молекулами, заключалась в длительной выдержке канала с атомарно-чистой металлической поверхности в атмосфере либо кислорода, либо остаточных газов вакуумной камеры. Во втором случае длительность выдержки достигала нескольких суток. С помощью масс-спектрометра проводился вторичный анализ возможных поверхностных примесей по химическому составу остаточных газов. При этом характерными компонентами спектра являются  $H_2$ ,  $He$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $CO_2$ .

В процессе исследований получены данные о влиянии химического состава поверхности на свободномолекулярное течение газов в цилиндрическом канале для ряда инертных газов  $He$ ,  $Ne$ ,  $Ar$ ,  $Kr$ . Химический состав поверхности канала изменялся от атомарно-чистой металлической до поверхности, полностью покрытой адсорбированными молекулами.

В таблице 1 представлены результаты измерения приведённой свободномолекулярной газовой проводимости  $M^*$  цилиндрического канала с атомарно-чистой поверхностью металла ( $Ag$ ,  $Ti$ ) и полностью адсорбированной поверхностью ( $Me+ads.$ ). Величина  $M^*$  может быть представлена следующим образом:

$$M^* = \frac{M}{M_{dif}}, \quad (1)$$

где  $M_{dif}$  - значение проводимости канала, соответствующее полностью диффузному рассеянию поверхностью молекул данного газа.

Таблица 1. Значения приведённой газовой проводимости и погрешности измерения  $M^* \pm \Delta M^*$  для различных поверхностей и газов.

газ / поверхность	He	Ne	Ar	Kr
<i>Ag</i>	1.62 ±0.05	1.39 ±0.03	1.23 ±0.04	1.15 ±0.04
<i>Ag+ads.</i>	1.04 ±0.03	1.03 ±0.02	1.01 ±0.02	1.00 ±0.02
<i>Ti</i>	1.65 ±0.07	-	1.25 ±0.04	1.14 ±0.05
<i>Ti+ads.</i>	1.04 ±0.02	-	1.02 ±0.02	1.01 ±0.02
<i>Mo+ads.</i>	1.03 ±0.03	1.03 ±0.02	1.02 ±0.02	1.00 ±0.02

На основании полученных экспериментальных данных сформулированы следующие основные положения, отражающие характер влияния химического состава поверхности на газодинамическую проводимость канала в свободномолекулярном режиме.

- Газовая проводимость канала с атомарно-чистой поверхностью металла существенно превышает проводимость канала с поверхностью, полностью покрытой адсорбатом.

- Наблюдается ярко выраженная зависимость газовой проводимости канала с атомарно-чистой поверхностью металла от рода газа.
- Проводимость канала с атомарно-чистой металлической поверхностью, по-видимому, слабо зависит от рода металла. В частности, для исследованных *Ag* и *Ti* поверхностей значения газовых проводимостей совпадают в пределах погрешности эксперимента.
- Проводимость канала с поверхностью, полностью покрытой адсорбатом, слабо зависит от природы подложки и рода газа.

Для сравнения и интерпретации полученных результатов используются экспериментальные данные по рассеянию молекулярных пучков и созданный на их основе формализм для описания рассеяния газовых молекул поверхностью твёрдого тела [1].

Следуя разработанному формализму, рассеяние газа атомарно-чистой поверхностью металла можно отнести к тепловому режиму, в котором тепловые колебания атомов поверхности являются доминирующим фактором, определяющим характер взаимодействия атомов газа с поверхностью. Этот режим рассеяния характеризуется относительно плоской эффективной поверхностью взаимодействия. По крайней мере, такой её «видит» налетающий атом. При этом взаимодействие в системе «газ - твёрдое тело» происходит на относительно больших расстояниях от поверхности, при которых практически отсутствует проникновение атома газа в поверхность.

Рассеяние газа физадсорбированной поверхностью относят обычно к структурному режиму, когда эффективная поверхность взаимодействия – шероховатая и взаимодействие происходит на расстояниях, допускающих проникновение атома газа в поверхность. Как следствие, такой режим взаимодействия характеризуется высокой вероятностью захвата атома газа поверхностью, которые потом испускаются по диффузному закону. Этот факт в условиях данного эксперимента проявляется в том, что газовая проводимость канала с поверхностью, покрытой адсорбатом, существенно ниже проводимости канала с атомарно-чистой поверхностью металла.

Влияние рода газа на проводимость канала обусловлено двумя причинами: с одной стороны, это влияние на процесс рассеяния в тепловом режиме массы атома газа  $m_0$ , которая существенно возрастает от *He* к *Kr*. С другой стороны, влияние глубины потенциальной ямы  $D$ , которая также заметно возрастает от *He* к *Kr* [3]. Таким образом, эффект влияния  $m_0$  в рамках данного эксперимента не удаётся отделить от эффекта влияния  $D$ , одно из проявлений которого состоит в том, что меняется доля падающих атомов, которые захватываются поверхностью, а затем испускаются, вероятно, по диффузному закону. Вполне возможно, что эти два эффекта не являются независимыми друг от друга. Тем не менее, в настоящее время считается установленным, что аргон, криптон и ксенон в большей степени захватываются металлическими поверхностями, чем гелий или неон. Следовательно, у «лёгких» газов больше атомов рассеивается поверхностью упруго, чем у «тяжёлых». Этот факт и проявляется в том, что в тепловом режиме рассеяния газовая проводимость канала по *He* и *Ne* выше, чем по *Ar* и *Kr*.

Взаимодействие в системе «газ – поверхность» в тепловом режиме происходит на расстояниях, при которых атомы газа не могут «чувствовать» свойства

материалов, из которых изготовлена поверхность. В связи с этим можно предположить, что особенности рассеяния в тепловом режиме в большей степени определяется характеристиками кристаллической структуры, чем химической природой материала.

Одной из основных характеристик кристаллической структуры металла является радиус атома поверхности  $R_s$  [1]. Для примера,  $R_s = 1,44 \text{ \AA}$  для  $Ag$ ,  $Au$ ,  $Ti$ . Большинство металлов имеют близкие по значению  $R_s$ . Таким образом, следует ожидать одинакового характера рассеяния молекул металлическими поверхностями, что подтверждается множеством экспериментов по молекулярным пучкам. Так, например, в работе [4] получены практически одинаковые индикатриссы рассеяния атомов  $Ar$  на поверхности металлов  $Ag(111)$ ,  $Pt(111)$  и  $W(110)$ . В случае нашего эксперимента тот факт, что газовая проводимость канала с атомарно-чистой металлической поверхностью  $Ag$  и  $Ti$  не зависит от рода металла, по всей видимости, связан с одинаковым характером рассеяния инертных газов поликристаллическими поверхностями  $Ag$  и  $Ti$ .

Режим рассеяния, в котором вероятность захвата (проникновения) равна единице, принято называть адсорбционным. В адсорбционном режиме отсутствует зависимость параметров рассеяния от природы поверхности и рода газа, так как взаимодействие в системе «газ - твердое тело» полностью подчиняется диффузному закону. В структурном режиме такая зависимость ещё остаётся, но не является доминирующей. Как следствие, газовая проводимость канала с поверхностью, покрытой адсорбатом, не существенным образом зависит от природы поверхности и рода газа.

В третьей главе рассмотрены особенности применения метода прямого статистического моделирования Монте-Карло (DSMC) в задачах о внутреннем обтекании поверхности разреженным газом. В начале главы кратко изложены теоретические основы метода [5].

Представлены результаты применения метода Монте-Карло к задаче о релаксации разреженного газа в ограниченном пространстве.

Недавно [6] метод Монте-Карло был использован для исследования влияния формы вакуумной камеры на функцию распределения газовых молекул в свободномолекулярном режиме. Как показано в этой работе, наблюдается неоднородное распределение концентрации газовых молекул в объёмах, ограниченных криволинейными поверхностями (сфера, цилиндр), в отличие от объёмов, ограниченных плоскими поверхностями (куб, параллелепипед), где распределение носит равномерный характер. Как результат, в объёмах с криволинейными поверхностями равновесное состояние газа не подчиняется Максвелловской функции распределения. Такой результат вступает в противоречие с общепринятой концепцией о функции распределения в равновесном состоянии.

С другой стороны, экспериментальные исследования, проведённые авторами [6], не выявили таких особенностей в поведении газовых молекул. Независимо от формы ограничивающей поверхности в свободномолекулярном режиме наблюдается равномерное распределение концентрации газовых молекул по объёму. Как вывод, авторы ставят под сомнение работоспособность метода Монте-Карло для моделирования поведения газовых молекул в объёмах, ограниченных криволинейными поверхностями.

Автором настоящей работы разработан программный продукт, с помощью которого возможно моделировать поведение газовых молекул в ограниченном пространстве, изменяя форму ограничивающей поверхности, закон рассеяния на поверхности, температуру поверхности и начальное распределение частиц в объеме. В работе реализована свободномолекулярная версия метода прямого статистического моделирования Монте-Карло (DSMC) [5].

В качестве начальных условий были приняты следующие положения:

- начальное состояние газовых молекул в объеме описывается Максвелловской функцией распределения с температурой  $T_0$ ;
- температура поверхности  $T_{\text{пов}}^*$  отлична от температуры газа (температурное возмущение).

Для решения задачи в общем виде использовались относительные параметры, описывающие состояние газа:

$$n^* = n/n_0, \quad T^* = T/T_0, \quad t^* = t \cdot \left( r/v_0 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $n$  – газовая концентрация,  $T$  – температура газа,  $t$  – время,  $n_0$ ,  $v_0$  – начальные значения концентрации и наиболее вероятной скорости газовых молекул,  $r$  – характерный размер объема.

Задача решалась для трёх видов поверхностей, ограничивающих объем: криволинейной (сфера), плоской (куб, параллелепипед) и комбинации криволинейной и плоской поверхности (цилиндр).

Рассмотрено поведение газа без температурного возмущения ( $T_{\text{пов}}^* = T_0$ ) для случая полностью диффузного (следуя работе [6]), зеркального и зеркально-диффузного закона рассеяния молекул поверхностью. Показано, что для любого момента времени не наблюдается отклонения функции распределения модельных частиц в объеме от равновесной Максвелловской функции распределения для случая диффузного, зеркально-диффузного и зеркального закона рассеяния независимо от формы ограничивающей поверхности.

Установлен характер релаксации основных параметров, описывающих состояние газа в случае температурного возмущения (нагрев или охлаждение). В качестве примера результатов моделирования на рисунках 3 и 4 представлена релаксация концентрации (а) и температуры (б) газа в кубе вдоль продольной оси (рис. 3) и в сфере вдоль радиуса (рис. 4) в случае диффузного рассеяния молекул поверхностью для начальной температуры поверхности  $T_{\text{пов}}^* = 2$  (нагревание).

Картина релаксации концентрации и температуры при охлаждении является почти зеркальным отображением картины релаксации при нагревании относительно плоскости  $n^*=1$  для релаксации концентрации и  $T^*=1$  для релаксации температуры. Отличие состоит в том, что при охлаждении процесс релаксации происходит медленнее, чем при нагревании в силу того, что газовые молекулы при охлаждении в среднем обладают более низкими тепловыми скоростями, чем при нагревании.

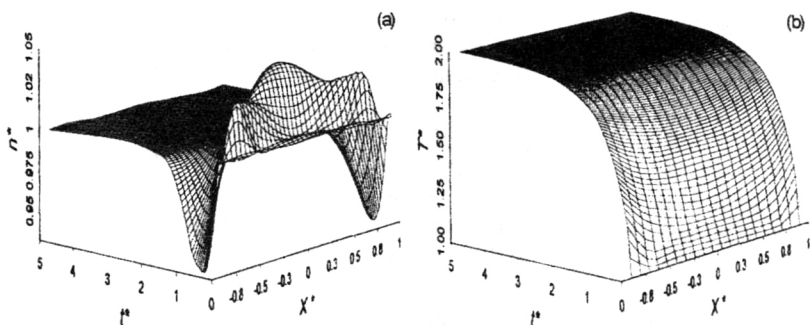


Рис. 3 (а, б). Релаксация концентрации  $n^*$  (а) и температуры  $T^*$  (б) газа в кубе (параллелепипеде) при диффузном рассеянии поверхностью вдоль продольной оси  $X$  ( $Y$  или  $Z$ ) для начальной температуры поверхности  $T_{\text{нов}}^* = 2$  (нагревание).

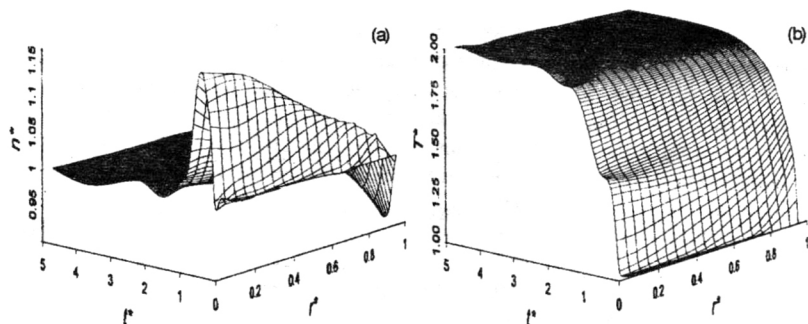


Рис. 4. (а, б). Релаксация концентрации  $n^*$  (а) и температуры  $T^*$  (б) газа в сфере при диффузном рассеянии поверхностью вдоль радиуса  $r^*$  для начальной температуры поверхности  $T_{\text{нов}}^* = 2$  (нагревание).

Таким образом, в третьей главе показано, что равновесная Максвелловская функция распределения в объёме достигается во всех случаях моделирования независимо от формы поверхности. Описана релаксация разреженного газа в объёме для различной формы поверхности, ограничивающей этот объём.

**В четвёртой главе** представлены результаты численного моделирования эксперимента по исследованию влияния покрытия поверхности на течение газа в цилиндрическом канале.

Целью численного моделирования течения газа через цилиндрический канал в свободномолекулярном режиме являлось получение зависимостей, сравнение которых с экспериментом позволит определить параметры, характеризующие границу раздела «газ - твёрдое тело».

Как известно, в случае длинного цилиндрического канала (т.е.  $l \gg r$ ) и значений  $\varepsilon$  близких к единице в области свободномолекулярного режима течения коэффициент диффузности  $\varepsilon$  можно найти, используя формулу Смолуховского:

$$M^* = \frac{2 - \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (3)$$

Условие, накладываемое на значения коэффициента диффузности  $\varepsilon$ , приводит к тому, что величина  $M(\varepsilon)$  должна мало отличаться от значения  $M_{\text{дф}}$ .

Для измерений, результаты которых представлены в таблице 1, в силу ограниченности канала ( $l/r=34.4$ ) и существенного превышения  $M(\varepsilon)$  значений  $M_{\text{дф}}$  использование для расчёта формулы Смолуховского не корректно. Поэтому коэффициент диффузности  $\varepsilon$  рассчитывался с использованием метода прямого статистического моделирования Монте-Карло – метода пробной частицы ТРМС [5].

Газовая проводимость канала  $M$  в свободномолекулярном режиме определяется выражением:

$$M = \frac{1}{4} \cdot W \cdot S \cdot v_i \quad (4)$$

где  $W$  – вероятность прохождения канала,  $S$  – площадь входного сечения канала,  $v_i$  – средняя тепловая скорость молекул газа. Величина  $W$  учитывает влияние геометрии канала, структуры и природы поверхности на поток газа в канале.

Берман [7] получил аналитическое выражение для вероятности прохождения  $W$  гладкого цилиндрического канала конечной длины ( $L = l/r$ ) в предположении о полностью диффузном рассеянии молекул поверхностью ( $\varepsilon=1$ ). В таблице 2 представлены для сравнения результаты расчётов вероятности прохождения  $W$ , полученные методом ТРМС в случае диффузного отражения и с помощью выражения Бермана.

Как видно из таблицы, наблюдается удовлетворительное совпадение результатов ТРМС расчётов с соответствующими значениями, полученными с использованием выражения Бермана.

К сожалению, аналитического выражения для вероятности прохождения  $W$  с произвольным значением коэффициента диффузности  $\varepsilon$  в настоящее время не получено [8], что явилось дополнительной причиной проведения ТРМС расчётов, выполнение которых не накладывает ограничений на значения  $\varepsilon$ .

Задача расчета коэффициента диффузности  $\varepsilon$  для данного экспериментального значения приведённой газовой проводимости  $M^*$  заключалась в подборе такого значения  $\varepsilon$ , что бы в пределах погрешности расчёта удовлетворялось следующее соотношение:

Таблица 2. Вероятность прохождения  $W$  цилиндрического канала в случае диффузного отражения.

$L$	$W$	
	*	**
0.1	0.9524	0.9525
1	0.6720	0.6716
10	0.1910	0.1919
20	0.1094	0.1098
40	0.05949	0.05977

\* Берман [7]

\*\* ТРМС расчёт

$$M^* = \frac{W(\varepsilon)}{W(\varepsilon = 1)}. \quad (5)$$

Результаты расчёта коэффициентов диффузности  $\varepsilon$  для различных поверхностей и газов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Коэффициенты диффузности  $\varepsilon$  для различных поверхностей и газов.

газ / поверхность	He	Ne	Ar	Kr
Ag	0.71	0.80	0.88	0.92
Ti	0.70	-	0.87	0.92
Me+ads.	0.97	0.97	0.99	1.00

На рисунке 5 представлены результаты ТРМС расчётов приведённой газовой проводимости  $M^*$  как функции относительной длины канала  $L$  и коэффициента диффузности  $\varepsilon$ . Значение  $M^*$  вычислялось согласно выражению (5). Пунктирной линией на рисунке показаны значения  $M^*$ , полученные с использованием формулы Смолуховского (3) для соответствующего коэффициента диффузности  $\varepsilon$ .

Как следует из рисунка 5, величина приведённой проводимости  $M^*$  увеличивается с ростом длины канала, однако, достигнув определённых значений при  $L \sim 100$  практически перестаёт изменяться. Дальнейшее увеличение длины канала не приводит к изменениям величины приведённой проводимости  $M^*$ , что свидетельствует об отсутствии эффекта, связанного с ограниченностью канала.

С другой стороны, как видно из рисунка, некорректное применение формулы Смолуховского действительно может приводить к значительным ошибкам в вычислениях. Причём величина ошибки увеличивается с уменьшением коэффициента  $\varepsilon$ . Так, например, для канала, используемого в эксперименте  $L = 34.4$ , и коэффициента диффузности  $\varepsilon = 0.7$  применение формулы (3) может привести к ошибке вычислений в 15 %.

Следующим этапом численного моделирования являлось описание процесса изменения газовой проводимости  $M^*$  в процессе экспозиции поверхности

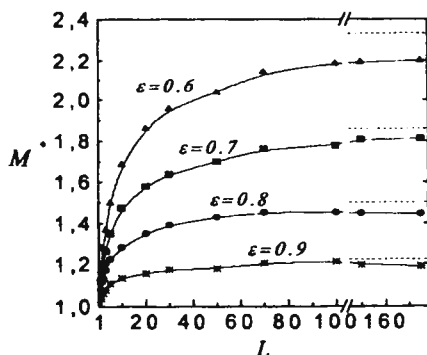


Рис. 5. Результаты ТРМС расчётов приведённой газовой проводимости  $M^*$  цилиндрического канала как функции относительной длины канала  $L$  и коэффициента диффузности  $\varepsilon$  (пунктирной линией показаны значения  $M^*$ , полученные с использованием формулы Смолуховского (3) для соответствующего коэффициента диффузности  $\varepsilon$ ).

канала в кислороде. Экспериментальные результаты, полученные ранее [2], служили основой для сравнения.

Численное моделирование проводилось в две стадии. На первой стадии моделировался процесс распространения кислородного покрытия поверхности цилиндрического канала от источника кислорода, находящегося на одном из концов канала. На этой стадии рассчитывалась неоднородная степень покрытия  $\theta$  поверхности канала кислородом как функция величины экспозиции (рис. 6а).

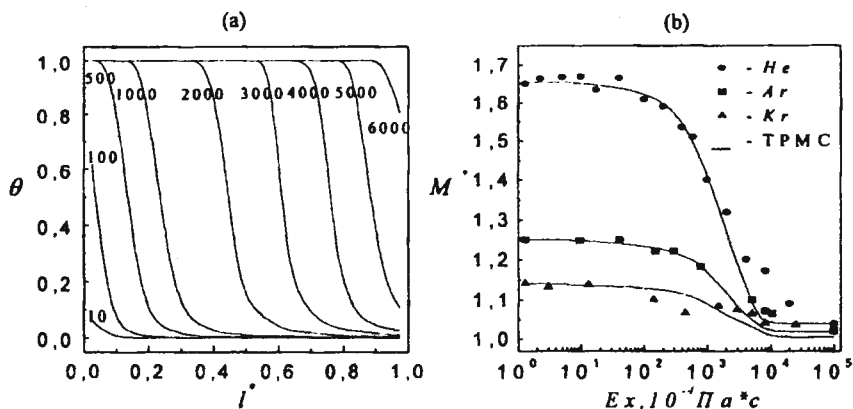


Рис. 6 (а, б). (а) - распространение кислородного покрытия поверхности цилиндрического канала от источника кислорода, находящегося на одном из концов канала при  $l^*=0$ . ( $\theta$  - относительная степень покрытия,  $l^*$  - безразмерная длина, на кривых указана соответствующая величина экспозиции в Ленгмюрах  $10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ); (б) - сравнение ТРМС расчётов с экспериментальными данными: приведённая газовая проводимость канала с поверхностью титана как функция поверхностных условий (величина экспозиции).

На второй стадии рассчитывалась приведённая газовая проводимость канала  $M^*$  с поверхностным покрытием, смоделированным на первой стадии. Предполагалось, что в данной точке поверхности канала с вероятностью, равной степени покрытия  $\theta$ , частица рассеивается адсорбированной поверхностью, а с вероятностью  $(1-\theta)$  отражение происходит от атомно-чистой поверхности. В этом случае отражение от поверхности канала моделировалось с использованием Максвелловской зеркально-диффузной модели рассеяния с коэффициентами диффузности  $\xi$ , представленными в таблице 3.

Как результат численного моделирования получена зависимость газовой проводимости канала от экспозиции поверхности канала в кислороде, которая представлена на рисунке 6(б). Этот результат находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными, опубликованными ранее в работе [2].



Пятая глава посвящена исследованию влияния шероховатости на свободномолекулярное течение газа в прямоугольном канале.

Современное состояние теоретического исследования взаимодействия газов с поверхностью твёрдых тел не может обходиться без представлений о реальной структуре поверхности. Предположение о гладкой поверхности приводит к ряду физически необоснованных понятий, таких, как “сверхдиффузное” рассеяние и коэффициент обратного отражения. С другой стороны, чрезвычайно сложно аналитически получить закон рассеяния от некой гладкой поверхности, который включал бы в себя также параметры, характеризующие микроскопическую структуру поверхности. По-видимому, обоснованным является подход, который рассматривал бы отражение газовых молекул от гладкой поверхности отдельных элементов структуры, моделирующей шероховатость реальной поверхности.

Эффект влияния структуры поверхности на свободномолекулярное течение газа в цилиндрических каналах впервые достаточно полно исследован в работе [9] путём постановки эксперимента на каналах с различной обработкой поверхности, а также численного моделирования задачи методом Монте-Карло. К сожалению, цилиндрическая геометрия канала не позволяет экспериментатору непосредственно в ходе эксперимента контролировать структуру и химический состав поверхности. Прямоугольная форма канала имеет то неоценимое с точки зрения эксперимента преимущество, что позволяет контролируемо менять как геометрию канала, так и свойства поверхности. При наличии такого контроля становится возможным связать изменяющиеся условия на поверхности с макроскопическими характеристиками течения, что, в свою очередь, позволяет проверить адекватность модельных представлений и получить из сравнения теории с экспериментом параметры межфазного взаимодействия «газ - твёрдое тело».

Для решения задачи в общем виде использовались относительные характеристики канала:  $L=l/h$  - относительная длина и  $B=b/h$  - относительная ширина. Параметры  $l$ ,  $b$ ,  $h$ , соответственно, - длина, ширина и высота канала. Для расчёта вероятности прохождения без столкновения с поверхностью  $W_0$  и общей вероятности прохождения  $W_2$  прямоугольного гладкого канала с произвольной длиной  $L$  и шириной  $B$  реализован метод пробной частицы Монте-Карло (ТРМС).

Аналитическое выражение для вероятности прохождения  $W_2$  прямоугольного гладкого канала конечной длины  $L$  в предположении о бесконечности ширины канала ( $B \rightarrow \infty$ ) и полностью диффузном отражении молекул от поверхности ( $\epsilon=1$ ) получено в работе [7]. Аналитического решения аналогичной задачи для вероятности прохождения  $W_2$  с произвольным значением коэффициента диффузности  $\epsilon$  и ширины канала  $B$  в настоящее время не получено [8]. Это явилось дополнительной причиной проведения ТРМС расчёта, выполнение которого не накладывает ограничений на значения  $\epsilon$  и  $B$ .

На рисунке 7 представлена вероятность прохождения гладкого канала  $L=10$  без столкновения с поверхностью  $W_0$  и общая вероятность прохождения  $W_2$  как функция ширины канала  $B$  для различного коэффициента диффузности  $\epsilon$ . Как следует из рисунка, величина  $W_0$  и  $W_2$  увеличивается с ростом ширины канала  $B$ , однако, достигнув определённых значений при  $B \sim 1000$  практически перестаёт изменяться. Дальнейшее увеличение ширины канала не приводит к существенным изменениям вероятности прохождения.

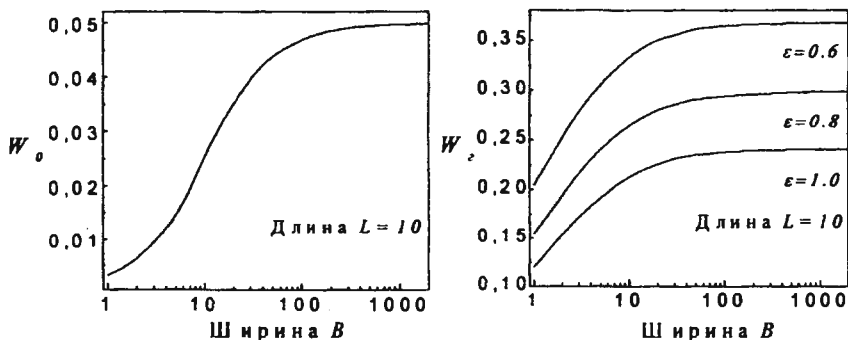


Рис. 7. Вероятность прохождения канала  $L=10$  без столкновений с поверхностью  $W_0$  и общая вероятность прохождения  $W_2$  как функция ширины канала  $B$  для различного коэффициента диффузии  $\epsilon$ .

В таблице 4 представлены для сравнения результаты ТРМС расчёта вероятности прохождения  $W_2$  в случае диффузного отражения молекул от стенок канала со значениями, вычисленными Берманом. Как видно из таблицы, существует удовлетворительное совпадение результатов ТРМС расчёта, выполненного для каналов с параметрами  $L=1$ ;  $B=100$  и  $L=10$ ;  $B=1000$ , с соответствующими значениями работы [7]. Совпадение результатов указывает на пренебрежимо малый вклад боковых стенок в формирование свободномолекулярного потока.

Это обстоятельство может быть использовано как в экспериментах, так и при моделировании соответствующей задачи. В частности, в экспериментах с так называемыми «щелевыми каналами», для которых  $b \gg h$ , можно ограничиться контролем состояния поверхности только верхней и нижней пластин, а при моделировании не учитывать структуру боковых поверхностей.

С целью развития модельных представлений о процессе взаимодействия газовых молекул с реальной поверхностью проводилось численное моделирование свободномолекулярного течения газа в прямоугольном канале ТРМС методом. В процессе моделирования определялась вероятность прохождения  $W$  канала как функция параметров модели шероховатости поверхности. Расчёты выполнены для канала с длиной  $L=1$ ;  $10$  и шириной  $B=100$ ;  $1000$ , соответственно.

Показано, что величина вероятности прохождения  $W$  не зависит от высоты микронеровностей  $R=r/h$ , где  $r$  – параметр модели шероховатости, характеризующий высоту микронеровностей. Это факт согласуется с утверждением работы [10].

Таблица 4. Вероятность прохождения  $W_2$  прямоугольного гладкого канала в случае диффузного отражения.

$L$	$W_2$	
	*	**
1	0.6844	0.6842
10	0.2408	0.2406

\* Берман [7]

\*\* ТРМС расчёт ( $B=100$ ;  $1000$ )

С другой стороны обнаруживается влияние коэффициента диффузности  $\varepsilon$  на величину вероятности прохождения  $W$ . Это влияние проявляется по-разному в канале с длиной  $L=1$  и  $L=10$ , что обусловлено эффектом ограниченности канала.

На рисунке 8 представлена вероятность прохождения канала  $W$  с симметричной моделью шероховатости поверхности как функция угла наклона микроплощадок для различного коэффициента диффузности  $\varepsilon$  и длины канала  $L$ . Аналогичные расчёты представлены в работе [11] для случая 2-мерной шероховатости поверхности при полностью диффузном рассеянии  $\varepsilon=1$ .

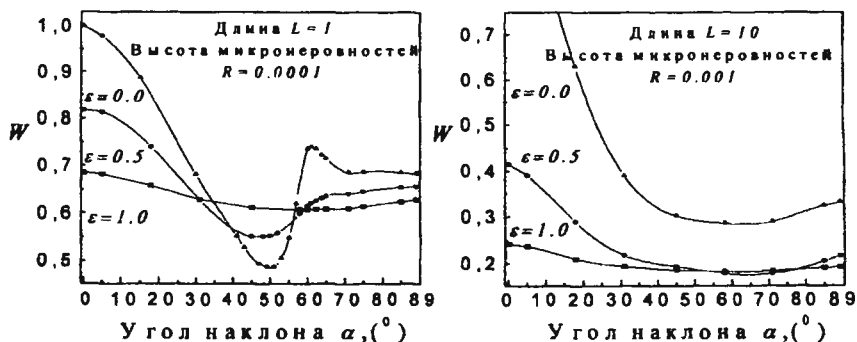


Рис. 8. Вероятность прохождения канала с симметричной моделью шероховатости поверхности как функция угла наклона для различного коэффициента диффузности  $\varepsilon$  и длины канала  $L$ .

Очевидно, что расчёты, представленные в настоящей работе, практически соответствуют 2-мерному случаю, т.к. один из размеров канала (ширина  $B=100; 1000$ ) значительно превышает два остальных (длина  $L=1; 10$  и высота  $H=1$ ). Поэтому неудивительно совпадение кривой на рисунке 8, соответствующей полностью диффузному отражению ( $\varepsilon=1$ ), с расчётными данными, представленными в работе [11].

Аналогичным образом рассчитана вероятность прохождения канала с несимметричной моделью шероховатости поверхности как функция угла наклона микроплощадок для различного коэффициента диффузности  $\varepsilon$ . Показано, что наличие диффузности в законе рассеяния уменьшает влияние вида шероховатости на значения вероятности прохождения. Так, при полностью диффузном рассеянии различия в зависимостях вероятности прохождения от угла наклона, связанные с особенностями построения модели шероховатости, практически исчезают.

Кроме того, получена зависимость среднего количества столкновений частицы с поверхностью  $n$  для симметричной модели шероховатости от угла наклона микроплощадок для различных коэффициентов диффузности  $\varepsilon$ . Показано, что значительное отклонение  $n$  от единицы начинается при углах наклона  $\alpha > 50^\circ$ .

Расчитаны параметры, характеризующие течение газа в канале с существенно несимметричной моделью шероховатости поверхности, в частности  $W_0$ ,

$W$ ;  $n$ ; средний путь, который проходит частица в канале; среднее время прохождения канала. Расчёты выполнены таким образом, что в одном случае частицы стартуют с одного входного сечения канала, в другом случае - с противоположного. Показано, что для обоих случаев моделирования данные параметры с точностью до погрешности вычислений одинаковы, что послужило своеобразным тестом правильности проводимых расчётов.

Представлены результаты ТРМС расчёта вероятности прохождения прямоугольного канала с учётом шероховатости поверхности как функция параметров модели шероховатости, длины канала  $L$  и коэффициента диффузности  $\varepsilon$ .

В работе [12] экспериментально исследовано течение инертных газов  $He$ ,  $Ne$ , и  $H_2$ ,  $D_2$  в прямоугольных стеклянных каналах в свободномолекулярном режиме. Полученные вероятности прохождения молекул некоторых газов оказались ниже теоретических значений, соответствующих предположению о полностью диффузном отражении молекул от некой гладкой поверхности, что может быть воспринято как «сверхдиффузность». Это указывает на то, что в рамках Максвелловской схемы граничных условий без учёта микроскопической структуры (шероховатости) поверхности невозможно корректное описание рассеяния газовых молекул стенками экспериментального канала.

Для учёта фактора шероховатости была предпринята попытка воспроизвести при численном моделировании задачи о течении газа в прямоугольном канале реальную поверхность. Функция распределения  $F(\alpha)$  микроплощадок по углам наклона для поверхности стекла, аналогичного стеклу, использованному в эксперименте с прямоугольным каналом [12], представлена на рисунке 9. Данная зависимость получена из экспериментов по рассеянию света [13].

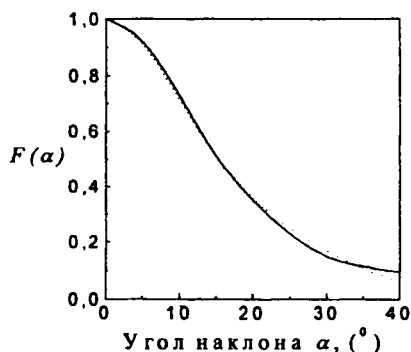


Рис. 9. Экспериментальные данные [13]: функция распределения микроплощадок по углам наклона для поверхности стекла.

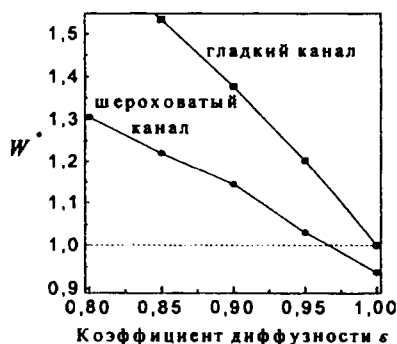


Рис. 10. Расчёт вероятности прохождения для гладкого и шероховатого канала как функция коэффициента диффузности  $\varepsilon$ .

При моделировании размеры модельного канала и высота микронеровностей были выбраны в соответствии с данными, представленными в работе [12]. Поверхность канала моделировалась с использованием симметричной модели шероховатости. При этом углы наклона микроплощадок были распределены по

закону, согласно которому плотность вероятности углового распределения корректно аппроксимирует экспериментальную зависимость, представленную на рисунке 9.

Результаты расчёта вероятности прохождения для гладкого и шероховатого канала как функция коэффициента диффузности  $\varepsilon$  показаны на рисунке 10 в терминах относительной вероятности  $W^* = \frac{W}{W_2(\varepsilon = 1)}$ . Как видно из рисунка,

вероятность прохождения модельного шероховатого канала ниже вероятности прохождения гладкого канала для любого значения  $\varepsilon$ . Таким образом, исключается эффект “сверхдиффузности”, возможный при описании экспериментальных данных без учёта реальной структуры поверхности.

В таблице 5 представлены значения коэффициентов диффузности  $\varepsilon$  для газов, исследуемых в работе [12]. Коэффициенты получены при сравнении расчётных данных, представленных на рисунке 10, с экспериментальными результатами работы [12].

Таблица 5. Значения коэффициента диффузности  $\varepsilon$  для разных газов.

$H_2$	$D_2$	$He$	$Ne$
1.00	0.99	0.97	0.96

Полученные значения коэффициентов диффузности  $\varepsilon$  хорошо согласуются с экспериментальными данными настоящей работы в случае полностью адсорбированной поверхности (таблица 3) и результатами работы [14], полученными при использовании иного экспериментального подхода к определению  $\varepsilon$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика исследования зависимости газовой проводимости канала от изменяющихся условий на поверхности на основе использования процедуры вакуумного напыления металла на внутреннюю поверхность канала с последующей адсорбцией газов и применения дифференциального микроманометра емкостного типа, обеспечивающего с высокой точностью измерение времени релаксации систем, возмущенных скачком давления.
2. Предложена методика приготовления внутренней поверхности цилиндрического канала путём термического напыления в глубоком вакууме. Данная методика позволяет получать тонкую плёнку металла атомарно-чистого состава.
3. С использованием сверхвысоковакуумного комплекса проведено экспериментальное исследование рассеяния газовых молекул поверхностью твёрдого тела в зависимости от химического состава методом измерения свободномолекулярной газодинамической проводимости канала. Обнаружено что, в случае длинного цилиндрического канала в свободномолекулярном режиме течения наблюдается воспроизводимое влияние характера рассеяния молекул поверхностью на газодинамическую проводимость канала. Характер рассеяния существенным образом зависит от химического состава поверхности.
4. На основании полученных экспериментальных данных сформулированы основные положения, отражающие характер влияния химического состава по-

верхности на газодинамическую проводимость цилиндрического канала в свободномолекулярном режиме. В частности:

- газовая проводимость канала с атомарно-чистой поверхностью металла существенно превышает проводимость канала с поверхностью, полностью покрытой адсорбатом;
  - наблюдается ярко выраженная зависимость газовой проводимости канала с атомарно-чистой поверхностью металла от рода газа;
  - проводимость канала с поверхностью, полностью покрытой адсорбатом, слабо зависит от природы подложки и рода газа.
5. В рамках существующего формализма в описании рассеяния молекулярных пучков поверхностью твёрдого тела дана качественная интерпретация полученных экспериментальных данных.
  6. С использованием метода пробной частицы Монте-Карло выполнено численное моделирование процесса свободномолекулярного течения газа в цилиндрическом канале, соответствующего условиям выполненного в работе физического эксперимента. Определены параметры, характеризующие границу раздела "газ - твёрдое тело", - коэффициенты диффузности для различных поверхностей и газов.
  7. В рамках метода Монте-Карло предложена процедура моделирования течения газа в канале с неоднородным химическим составом поверхности, которая была использована для исследования влияния степени покрытия поверхности кислородом на газодинамическую проводимость цилиндрического канала в процессе экспозиции. Получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.
  8. С использованием численного моделирования исследовано влияние структуры поверхности на свободномолекулярное течение газа в прямоугольном канале. Показано, что так называемое "сверхдиффузное" рассеяние, наблюдаемое в ряде экспериментов по течению является результатом неучёта фактора шероховатости. Учёт этого фактора приводит к удовлетворительному согласию расчётных и экспериментальных данных.
  9. Методом прямого статистического моделирования Монте-Карло исследован процесс релаксации разреженного газа в ограниченном пространстве. Получена картина релаксации основных параметров, описывающих поведение газа, для различной формы ограничивающей поверхности.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гудман Ф., Вахман Г. Динамика рассеяния газа поверхностью. - М.: Мир, 1980, 423с.
2. Nakarjakov A.V., Borisov S.F., Sharipov F.M., Suetin P.E. *The effect of the surface composition on a free molecular gas flow in a cylindrical channel*. Proceedings 19-th Int. Symp. Rarefied Gas Dynamics, Vol.2, Oxford University Press, Oxford, 1995, pp. 954-959.
3. Ossicini S. *Interaction potential between rare-gas atoms and metal surfaces*. Phys. Rev., B. 33, № 2, 1986, pp. 873-878.
4. Saw R., Merrill R.P. - J. Surface Science, v.34, № 2, 1973, p. 268.

5. Bird, G.A. *Molecular Gas Dynamics and Direct Simulation of Gas Flows*. - Oxford University Press, Oxford, 1996.
6. Nesterov S.B., Vassiliev Yu.K. and Kryukov A.P. *Influence of the chamber shape on the non-uniformity of gas distribution*. J. Vacuum, 53 (1-2), 1999, pp.193-196.
7. Berman S. - J. Appl. Phys. 1965, 36. p. 3356; 1966, 37. p. 2930(E).
8. Sharipov F., Seleznev V. *Data on Internal Rarefied Gas Flow*. J. Phys. Chem., 27 (3), 1998, pp. 657-706.
9. Davis, D.H., Levenson, L.L., Milleron, N. *Effect of "Rougher-than-Rough" Surface on Molecular Flow through Short Duct*. J. Appl. Phys., 1964, 35. pp. 529-532.
10. Баранцев Р.Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. - М.: Наука, 1975, 344 с.
11. Sugiyama W., Sawada T., Nakamori K. *Rarefied gas flow between two dimensional surface roughness*. J. Vacuum, 47 (6-8), 1996, pp. 791-794.
12. Породных Б.Т., Суетин П.Е., Борисов С.Ф. Течение газов в плоской щели в широком диапазоне чисел Кнудсена. ЖТФ, том XL, в. 11, 1970, с. 2383-2391.
13. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. - Л.: Машиностроение, 1988, 191 с.
14. Борисов С.Ф., Породных Б.Т., Суетин П.Е. Экспериментальное течение газов в капиллярах. ЖТФ, т. 42, 1972, с. 1310-1314.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Sazhin O.V., Borisov S.F., Sharipov F.M., Grachyov I.A. *Tangential Momentum Accommodation on Atomic Clean and Contaminated Surface*. Proceedings 21-th Int. Symp. Rarefied Gas Dynamics, Vol.1, Cepadues-Editions, Marseille, 1998, pp. 333-339.
2. Сажин О.В., Грачёв И.А., Борисов С.Ф., Накаряков А.В. *Применение мембранного микроманометра емкостного типа для регистрации динамической разности давлений*. Сборник трудов Четвертой Науч.-Техн. конф. с участием зарубеж. специалистов "Вакуумная наука и техника", г. Гурзуф, 23-30 сентября 1997г., с. 22-24.
3. Сажин О.В., Грачёв И.А., Борисов С.Ф., Накаряков А.В. *Влияние химического состава и структуры поверхности на перенос тангенциального импульса в системе газ-твёрдое тело*. Сборник трудов Всероссийской науч.-техн. конф. "Физика конденсированного состояния", г. Стерлитамак, 22-25 сентября 1997г., с. 11-13.
4. Борисов С.Ф., Накаряков А.В., Поликарпов Ф.Д., Сажин О.В. *Адсорбция кислорода на молибденовой плёнке, напылённой на стекло*. Сборник трудов Второй Науч.-Техн. конф. с участием зарубеж. специалистов "Вакуумная наука и техника", г. Гурзуф, октябрь 1995г., с.37.
5. Сажин О.В., Грачёв И.А., Борисов С.Ф., Поликарпов Ф.Д. *Перенос тангенциального импульса молекул при свободномолекулярном изотермическом течении газа в канале*. Сборник трудов Четвертой Науч.-Техн. конф. с участием зарубеж. специалистов "Вакуумная наука и техника", г. Гурзуф, 23-30 сентября 1997г., с. 25-27.
6. Сажин О.В., Грачёв И.А. *Исследование свободномолекулярного течения газа в канале с контролируемым химическим составом поверхности*. Сборник

- трудов V Международной конференции молодых учёных "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики", г. Новосибирск, 27-30 апреля 1998г., с. 292-295.
7. Сажин О.В., Грачёв И.А., Борисов С.Ф., Отт К.Ф. *Влияние адсорбции кислорода и водорода на течение инертных газов в канале*. Сборник трудов Второй Национальной Конференции по Теплообмену, г. Москва, 26-30 октября 1998 г., том 4, с. 265-269.
  8. Сажин О.В., Борисов С.Ф. *Взаимодействие молекул с поверхностью в газодинамических экспериментах*. - Сборник статей "Физические свойства металлов и сплавов", УГТУ-УПИ, Екатеринбург – 1999, с. 69-74.
  9. Сажин О.В., Герасимова О.Е., Борисов С.Ф. *Рассеяние газа атомарно-чистой и адсорбированной поверхностью*. - Сборник статей "Физические свойства металлов и сплавов", УГТУ-УПИ, Екатеринбург – 2000, с. 86-91.
  10. Сажин О.В., Власов А. А., Борисов С.Ф. *Формирование поверхности с заданными свойствами* - Сборник статей "Физические свойства металлов и сплавов", УГТУ-УПИ, Екатеринбург – 2000, с. 92-96.
  11. Oleg V. Sazhin, Alexander N. Kulev, Sergei F. Borisov. *Relaxation Process of Rarefied Gas in a Finite Space*. The Book of Abstract of 22-th Int. Symp. Rarefied Gas Dynamics, Sydney, 22-29 June 2000, <http://www.cfd.sandia.gov/rgd>.
  12. Oleg V. Sazhin, Sergei F. Borisov. *Surface Composition Influence on Internal Gas Flow at Large Knudsen Numbers*. The Book of Abstract of 22-th Int. Symp. Rarefied Gas Dynamics, Sydney, 22-29 June 2000, <http://www.cfd.sandia.gov/rgd>.
  13. Oleg V. Sazhin, Alexander N. Kulev, Sergei F. Borisov. *Surface Roughness Influence on Free Molecular Gas Flow in Rectangular Channels*. The Book of Abstract of 22-th Int. Symp. Rarefied Gas Dynamics, Sydney, 22-29 June 2000, <http://www.cfd.sandia.gov/rgd>.
  14. Borisov Sergei, Sazhin Oleg, Polikarpov Philippe. *Surface condition and geometry factor in normal and tangential momentum accommodation measurements*. Abstract of Papers 32-th IUVSTA Workshop On Gas-Surface Interaction, St-Petersburg, 25-29 September 2000, pp. 20-21.
  15. О.Е. Герасимова, О.В. Сажин, С. Ф. Борисов. *Метрологические аспекты применения мембранного микроманометра емкостного типа для регистрации динамической разности давления*. Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: Материалы международной научно-практической конференции: в 10 частях, Юж. – Рос. Гос. Тех. Ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, октябрь, 2000, Ч.9. - с. 10-12.

Подписано в печ. 04.04.2001г. Формат 60х84 1/16

Бумага типографская. Усл. печ. л.1

Тираж 100. Заказ № 92. Печать офсетная

Екатеринбург, К-83, пр. Ленина 51. Типолаборатория УрГУ